

Широкополосные суперлюминесцентные диоды диапазона 800–900 нм с колоколообразной формой спектра

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, М.А.Ладугин,
П.И.Лапин, А.А.Мармалюк, С.Д.Якубович

Экспериментально исследованы квантоворазмерные суперлюминесцентные диоды (СЛД) с экстремально тонкими активными слоями состава (AlGa)As и (InGa)As и центральными длинами волн около 810, 840, 860 и 880 нм. Их спектр излучения имеет форму, близкую к гауссовой, а его полуширина составляет 30–60 нм в зависимости от длины активного канала и уровня накачки. В непрерывном режиме инжекции мощность светоизлучающих модулей на основе таких СЛД может составлять 1.0–25 мВт на выходе одномодового световода. Продемонстрировано, что срок службы этих приборов превышает 30000 часов. На основе светоизлучающих модулей реализованы прототипы комбинированных источников света серии BroadLighter с колоколообразной формой спектра шириной до 100 нм.

Ключевые слова: наногетероструктура, квантоворазмерный суперлюминесцентный диод, оптическая когерентная томография.

1. Введение

Важнейшей характеристикой низкокогерентных источников света (Time-domain, Fourier-domain ОСТ), используемых в системах оптической когерентной томографии (ОКТ) [1], является автокорреляционная функция (АКФ), или функция когерентности, которая представляет собой фурье-образ спектра излучения и измеряется, например, как зависимость видности интерференционной картины от оптической разности хода в симметричном интерферометре Майкельсона. Ширина главного центрального максимума АКФ соответствует длине когерентности излучения $L_{\text{coh}} \approx \lambda_c^2 / \Delta\lambda$, где λ_c – центральная длина волны, $\Delta\lambda$ – полуширина оптического спектра. Эта величина определяет аксиальное разрешение получаемых томограмм. Наличие дополнительных максимумов, примыкающих к главному или отстоящих от него, уменьшает отношение сигнал/шум и ухудшает качество получаемых изображений. АКФ «идеального» для ОКТ излучения должна содержать единственный узкий максимум, соответствующий нулевой разности хода. Такую АКФ имеет излучение с широким гладким спектром гауссовой формы:

$$S(\lambda) = S_0 \exp[-\gamma(\lambda - \lambda_c)^2]. \quad (1)$$

Е.В.Андреева, С.Н.Ильченко, Ю.О.Костин, П.И.Лапин. ООО «Суперлюминесцентные диоды», Россия, 119454 Москва, п/я 70
М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк. ОАО «НИИ «Полос» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; e-mail: M.Ladugin@siplus.ru, marm@siplus.ru
С.Д.Якубович. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 27 декабря 2012 г., после доработки – 28 февраля 2013 г.

В качестве источников света для указанных систем ОКТ наиболее широкое применение нашли полупроводниковые суперлюминесцентные диоды (СЛД). Традиционные СЛД с «объемным» активным слоем имеют форму спектра, очень близкую к гауссовой. Именно такие СЛД с центральной длиной волны в диапазоне 820–840 нм были использованы в первой серийной ОКТ-системе медицинского назначения «Stratos» производства Carl Zeiss Meditec. Эти СЛД на основе двусторонней гетероструктуры (GaAl)As с отдельным ограничением и с поперечно-одномодовым активным каналом шириной в единицы микрометров имеют ширину спектра излучения 15–20 нм при выходной оптической мощности в десятки мВт.

Позднее были созданы квантоворазмерные СЛД того же спектрального диапазона с толщиной активного слоя порядка 10 нм [2–4]. Благодаря вкладу в суперлюминесценцию квантовых переходов не только из основной, но и из возбужденной подзоны, ширина их спектра может достигать 100 нм. Такие СЛД нашли самое широкое применение в ОКТ-системах, поскольку их использование позволило значительно повысить пространственное разрешение. Однако эти СЛД имеют спектр двугорбой формы, далекой от гауссовой, и пьедестал у центрального максимума АКФ, что не может не отразиться на качестве получаемых изображений. Типичные спектры и АКФ объемных и квантоворазмерных СЛД представлены на рис.1.

В квантоворазмерных СЛД со сверхтонкими (единицы нанометров) активными слоями возбужденная подзона смещается в область больших энергий. При этом при разумных плотностях постоянного тока инжекции (по крайней мере в СЛД с достаточно большой длиной активного канала L_a) возбужденная подзона не заполняется и спектр суперлюминесценции определяется квантовыми переходами только из основной подзоны. Форма спектра таких СЛД также близка к гауссовой, а его ширина сильно зависит от длины L_a и уровня накачки и может превышать 60 нм. Настоящая работа посвящена исследованию источников света на основе СЛД указанного типа.

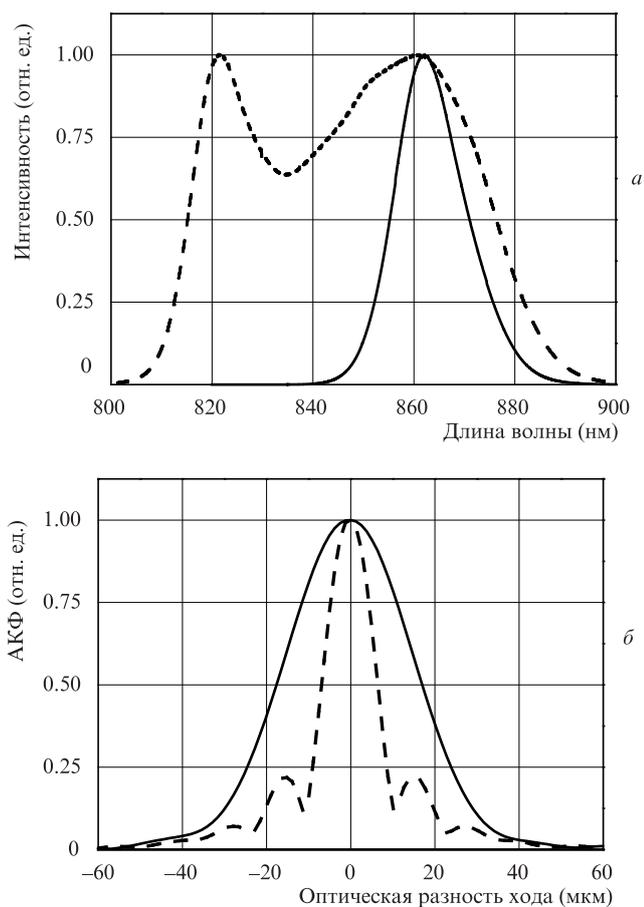


Рис.1. Типичные спектры (а) и центральные пики АКФ (б) объемных (сплошные кривые) и квантоворазмерных (штриховые кривые) СЛД.

2. Экспериментальные образцы

Экспериментальные образцы СЛД были изготовлены из полупроводниковых двусторонних гетероструктур с раздельным ограничением фотонного поля и носителей заряда (РО ДГС) и со стандартными для системы (AlGa)As геометрией и составами контактных, эмиттерных и волноводных слоев. Их особенностью являлась конструкция квантоворазмерной активной области, обеспечивающая возможность получить центральную длину волны усиленного спонтанного излучения в различных точках спектрального диапазона 800–900 нм и при этом позволяющая сильно «раздвинуть» спектральные максимумы, которые соответствуют квантовым переходам из основного и возбужденного состояний. Решение этой задачи невозможно при использовании традиционных для гетероструктур данного спектрального диапазона квантовых ям из GaAs. Проведенные расчеты показали, что практическая реализация указанных параметров требует использования напряженных сверхтонких квантовых ям из твердых растворов (AlGa)As или (InGa)As с небольшим содержанием Al или In. Такой подход позволяет увеличить высоту потенциального барьера квантовой ямы, что, в совокупности с ее малой шириной, дает возможность увеличить расстояние между уровнями размерного квантования до нужных значений. В расчетах использовалась модель прямоугольной квантовой ямы.

Гетероструктуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на подложках GaAs (100) в горизонтальном реакторе проточного типа. В качестве источников элементов III группы использовались триметилалюминий, триэтилгаллий и триметилиндий, материалом V группы выступал 100%-ный арсин, газом-носителем был водород. В качестве лигатур n- и p-типа использовались смесь силана с водородом и диэтилцинк соответственно. Температура роста изменялась в диапазоне 640–770 °С, а давление в реакторе – в диапазоне 60–65 Тор. В ходе настоящей работы были выращены 12 квантоворазмерных гетероструктур, различающихся составом и толщиной активного слоя d_a , которая варьировалась в пределах 4.5–9.0 нм. Из каждой эпитаксиальной пластины были изготовлены по несколько партий поперечно-одномодовых СЛД, отличавшихся только длиной L_a . Экспериментальные исследования физических характеристик этих СЛД позволили получить статистически достоверную информацию о зависимости выходных параметров образцов с одинаковыми длинами волн излучения от толщины их активного слоя, а также о выходных параметрах образцов с одинаковыми толщинами активных слоев различного состава.

Конструкция СЛД была традиционной. Активный канал представлял собой гребневидный волновод толщиной около 0.25 мкм и шириной 4 мкм, ось канала была наклонена под углом 7° относительно нормали к торцевым граням кристалла, на которые наносились антиотражающие покрытия. Длина L_a варьировалась в пределах 700–1600 мкм. Измерения проводились в непрерывном режиме инжекции при температуре 25 °С.

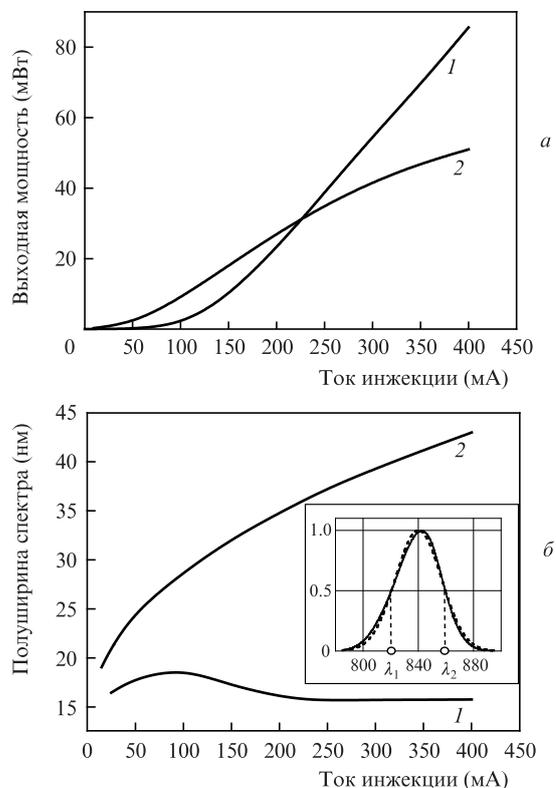


Рис.2. Типичные ватт-амперные характеристики (а) и зависимости полуширины спектра от тока инжекции (б) объемного (1) и квантоворазмерного (2) СЛД ($d_a^{\text{bulk}} = 28$ нм, $d_a^{\text{SQW}} = 6.5$ нм, $L_a = 1200$ мкм, ширина канала $W = 4$ мкм). На вставке – аппроксимация спектра квантоворазмерного СЛД функцией Гаусса (пунктирная кривая).

3. Экспериментальные результаты

На рис.2 изображены типичные ватт-амперные характеристики и зависимости полуширины спектра излучения от тока инжекции объемного и одного из исследованных квантоворазмерных СЛД. Образцы имеют абсолютно одинаковые конструкции и составы гетерослоев, а толщины активного слоя $d_a^{bulk} = 28$ нм (GaAs) и $d_a^{SQW} = 6.5$ нм ($In_{0.04}Ga_{0.96}As$) соответственно. Их спектры суперлюминесценции разительно отличаются как по ширине, так и по характеру ее зависимости от уровня накачки. Форма спектра обоих образцов близка к гауссовой. На вставке рис.2,б изображена аппроксимация спектра квантоворазмерного СЛД кривой (1) при $\lambda_c = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ и $\gamma = (-4 \ln 0.5) \times (\lambda_2 - \lambda_1)^{-2}$, что обеспечивает равенство полуширин. Небольшая асимметрия спектральной кривой практически не сказывается на «чистоте» центрального пика АКФ.

Спектральная плотность спонтанного излучения в рабочих режимах, характерных для СЛД, не поддается прямому измерению. Что же касается спектра однопроходного усиления $G(\lambda) = \exp[g(\lambda) - \alpha]L_a$, где α – коэффициент диссипативных потерь, то он может быть достаточно точно измерен для образцов полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) с использованием в качестве генератора входного сигнала перестраиваемого лазера соответствующего спектрального диапазона. Результаты таких измерений для ТЕ моды образцов ПОУ, изготовленных из тех же РО ДГС, что и сравнивавшиеся выше образцы СЛД, представлены на рис.3. Приведенные кривые качественно хорошо соответствуют поведению кривых на рис.2,б; это указывает на то, что ширина спектра суперлюминесценции определяется, главным образом, формой спектра оптического усиления.

Типичные выходные характеристики СЛД с активным слоем толщиной 4.5 нм при различных длинах активного канала и одинаковых плотностях тока инжекции представлены в табл.1. Как и следовало ожидать, с увеличением L_a мощность излучения и степень его поляризации возрастают, а ширина спектра уменьшается.

Длина волны около 840 нм является наиболее популярной для СЛД-модулей, используемых в ОКТ-системах. Нами была выращена серия однотипных квантоворазмерных РО ДГС с различными толщинами активных слоев, в которых за счет изменения химического состава твердого раствора (концентраций In и Ga) λ_m поддерживалась вблизи 840 нм. На рис.4 приведены значения выходной мощности и полуширины спектра при типичной рабочей плотности тока инжекции для СЛД, изготовленных из этих гетероструктур и имеющих квазигауссову форму спектра и различные L_a . «Короткие» СЛД с «толстыми» активными слоями при данной плотности тока обладают двугорбым спектром. Главный полученный ре-

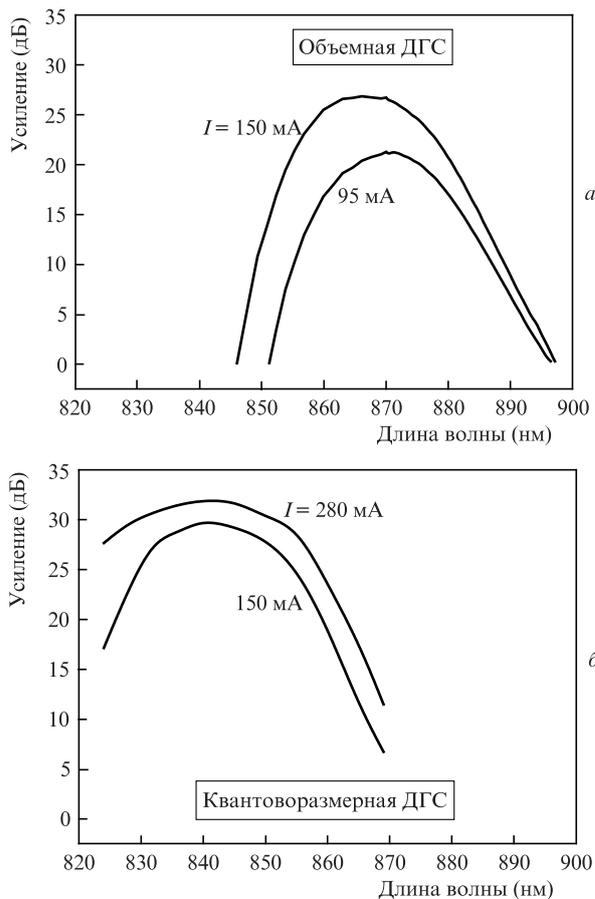


Рис.3. Спектры усиления в режиме малого сигнала ПОУ на основе объемной (а) ($L_a = 1200$ мкм) и квантоворазмерной (б) ($L_a = 1600$ мкм) РО ДГС.

зультат – очень слабая зависимость основных параметров СЛД от толщины активного слоя. Это выгодно отличает рассматриваемые приборы от СЛД со спектром двугорбой формы с выровненными спектральными максимумами (серии SLD-37, SLD-35 с $d_a^{SQW} \approx 10$ нм), у которых небольшое изменение d_a^{SQW} приводит к значительному изменению спектральных характеристик, что затрудняет получение воспроизводимых результатов при массовом производстве. В дальнейшем при серийном выпуске рассматриваемых приборов предполагается остановиться на значении d_a^{SQW} около 6.0 нм.

Изменение химического состава активного слоя РО ДГС при его постоянной толщине позволяет изменять в широких пределах медианную длину волны λ_m изготавливаемых СЛД. При смещении λ_m в коротковолновую сторону ширина спектра $\Delta\lambda$ несколько сужается, а остальные выходные характеристики изменяются слабо. На рис.5

Табл.1. Характеристики СЛД с активным слоем $In_{0.08}Ga_{0.92}As$ толщиной $d_a^{SQW} = 4.5$ нм при плотности тока инжекции $J \approx 5.5$ кА/см².

L_a (мкм)	I (мА)	J (кА/см ²)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	L_{coh} (мкм)	P_{TE}/P_{TM}
700	160	5.7	3.3	1.5	837	50	14	9.0
900	190	5.3	10.5	5.8	839	42	17	13
1100	240	5.5	24.5	15	840	36	20	19
1300	280	5.4	47	29	845	31	23	22
1600	350	5.5	77	45	850	26	28	28

Примечание: I – ток инжекции; P_{FS} – выходная мощность в открытое пространство; P_{SM} – мощность на выходе одномодового волоконного световода; λ_m – медианная длина волны; P_{TE}/P_{TM} – поляризационное отношение.

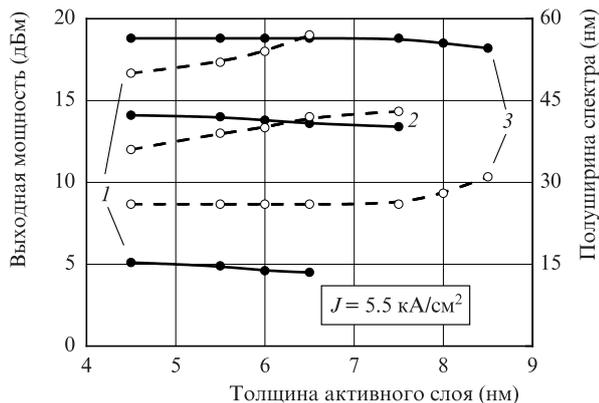


Рис.4. Зависимость выходной мощности (сплошные кривые) и полуширины колоколообразного спектра (штриховые кривые) от толщины активного слоя для квантоворазмерных СЛД с медианной длиной волны около 840 нм при $L_a = 700$ (1), 1100 (2) и 1600 мкм (3).

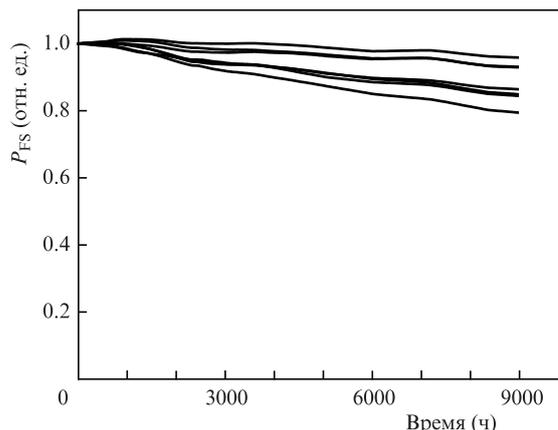


Рис.6. Хронограмма ресурсных испытаний СЛД типа II ($L_a = 1400$ мкм, $P_{FS} \approx 35$ мВт).

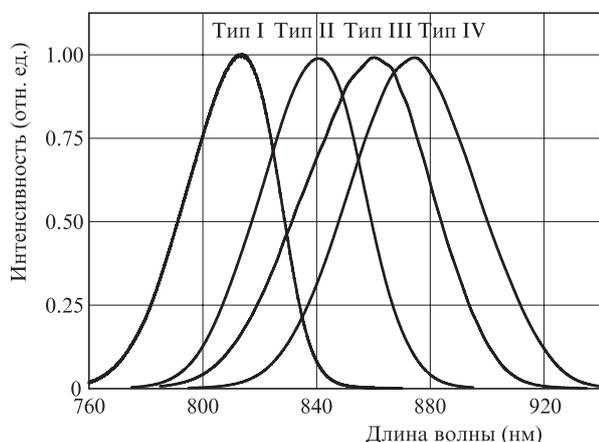


Рис.5. Типичные спектры излучения СЛД с различными составами активного слоя ($d_a^{SQW} = 6.0$ нм).

представлены типичные спектры четырех типов квантоворазмерных СЛД, исследованных нами. В табл.2 приведены основные характеристики этих СЛД при $L_a = 700, 900, 1100$ и 1300 мкм. Выбранные рабочие точки позволяют получить мощность на выходе одномодового волоконного световода около 1.0, 3.0, 10 и 20 мВт. Отметим, что маломощные «короткие» СЛД обладают рекордной шириной спектра около 60 нм.

Проведенные ресурсные испытания продемонстрировали достаточно высокую надежность разработанных СЛД. Хронограмма одного из таких испытаний представлена на рис.6. Спектральные характеристики СЛД измерялись перед началом испытаний и в дальнейшем через каждые 3000 ч непрерывной работы. Важно отметить, что после работы в течение 9000 ч (1 год) изменения значений λ_m и $\Delta\lambda$ не превышали 0.3% и 2.0% соответственно. Экстраполяция приведенных кривых позволяет оценить медианное время жизни как 35000 ч.

Проведенные исследования дали возможность приступить к серийному выпуску светоизлучающих модулей новой серии SLD-34, включающей в себя 24 модели, ко-

Табл.2. Характеристики СЛД I–IV типов с различными составами активного слоя ($d_a^{SQW} \approx 6.0$ нм) и длинами активных каналов.

Состав активного слоя и тип СЛД	L_a (мкм)	I (мА)	J (кА/см²)	P_{FS} (мВт)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	L_{coh} (мкм)	P_{TE}/P_{TM}
Al _{0.02} Ga _{0.98} As (тип I)	700	150	5.4	2.1	0.9	806	43	15	3
	900	200	5.5	6.5	3.0	806.5	35.5	18	4
	1100	250	5.7	18	10	807.5	33	20	6
	1300	260	5.0	32	19	809	27	24	10
In _{0.05} Ga _{0.95} As (тип II)	700	160	5.7	3.2	1.3	835	57	12	5
	900	180	5.0	8.5	4.1	840	46	15	7
	1100	240	5.5	24	13	844	42	17	15
In _{0.09} Ga _{0.91} As (тип III)	1300	280	5.4	46	24	847	34	21	25
	700	170	6.1	2.5	1.2	856	58	13	6
	900	195	5.4	7.9	4.0	856	49	15	10
In _{0.13} Ga _{0.87} As (тип IV)	1100	240	5.5	17	10	860	42	18	22
	1300	280	5.4	38	24	861	36	20.5	32
	700	170	6.1	2.8	1.4	872	63	12	13
In _{0.13} Ga _{0.87} As (тип IV)	900	180	5.0	6.2	3.1	875	50	15	16
	1100	200	4.5	18	9.5	876	48	16	28
	1300	240	4.6	34.5	19	879	44	17.5	34

Примечание: обозначения те же, что и в табл.1.

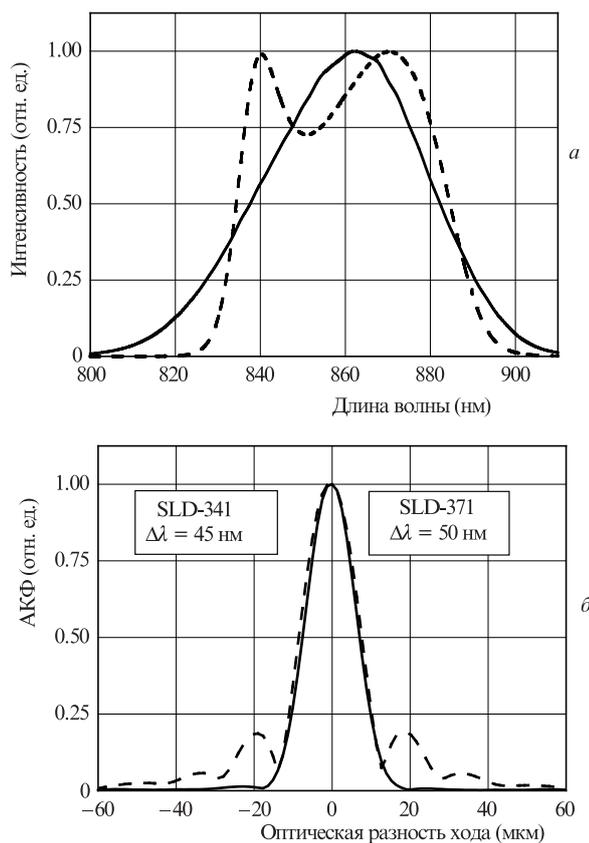


Рис.7. Спектры выходного излучения (а) и центральные пики АКФ (б) серийного модуля SLD-371 (штриховые кривые) и нового модуля SLD-341 (сплошные кривые).

торые различаются выходными характеристиками и типами корпусов. На рис.7 проводится сравнение спектральных характеристик новых приборов с характеристиками имеющих двугорбую форму спектра приборов серии SLD-37.

4. Комбинированные источники света с колоколообразной формой спектра

Наряду со светоизлучающими СЛД-модулями в ОКТ-системах и в оптической метрологии широкое распространение получили комбинированные источники света, в которых оптические выходы двух или более широкополосных СЛД-модулей со смещенными спектрами объединяются с помощью оптоволоконных разветвителей [5, 6]. Примером могут служить приборы серии BroadLighter отечественного производства. Их главные достоинства – высокая яркость и экстремально низкая когерентность. К сожалению, спектр излучения этих источников имеет сложную изрезанную форму, а высота пьедестала АКФ составляет 20%–25%.

Как известно, суперпозиция двух смещенных спектров гауссовой формы (1), близких по полуширине, позволяет при определенных условиях получить спектр колоколообразной формы, полуширина которого близка к сумме полуширин слагаемых спектров. Форма такого спектра слабо отличается от гауссовой, а пьедестал АКФ практически отсутствует. Именно такой подход был использован при исследовании прототипов новых двухканальных комбинированных источников света на основе разработанных СЛД-модулей с выводом излучения через

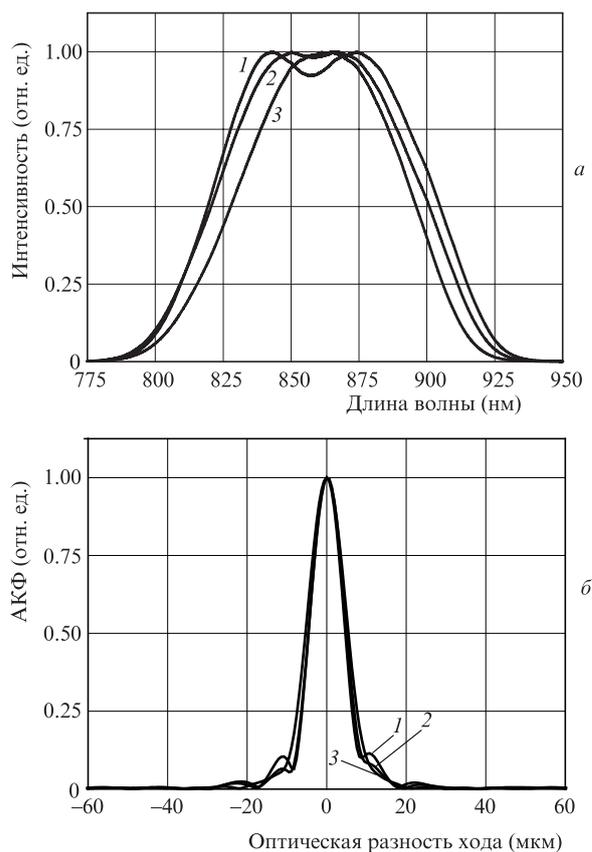


Рис.8. Суперпозиция спектров излучения СЛД типов II и IV в различных рабочих режимах 1–3 (а) и соответствующие центральные пики АКФ (б).

одномодовый световод. Для объединения выходных световодов применялись серийные разветвители сплавного типа с коэффициентами деления 50:50 или 40:60 для соответствующих центральных длин волн. На рис.8 показан процесс оптимизации формы спектра выходного излучения одного из исследованных прототипов. В данном случае суммировалось излучение двух модулей на основе СЛД типов II и IV с $L_a = 1100$ мкм. Формой результирующего спектра можно в широких пределах управлять, изменяя токи инжекции и рабочие температуры СЛД, а также используя одномодовые волоконные разветвители с различными зависимостями коэффициента деления от длины волны. В рассматриваемом случае ставилась задача получения «чистой» АКФ при максимально достижимой ширине спектра и $P_{SM} > 5.0$ мВт.

В табл.3 приведены основные технические характеристики реализованных прототипов. Указанные комбинации параметров при колоколообразной форме спектра реализованы впервые. Среди серийно выпускаемых при-

Табл.3. Примеры основных характеристик комбинированных источников света с колоколообразной формой спектра на основе разработанных СЛД.

Типы СЛД	L_a (мкм)	P_{SM} (мВт)	λ_m (нм)	$\Delta\lambda$ (нм)	L_{coh} (мкм)
I + II	900	3.0	830	70	9.8
	1100	8.0	830	65	10.5
I + III	700	1.0	830	100	6.9
	1100	7.0	860	80	9.2
II + IV	1300	20	860	70	10.5

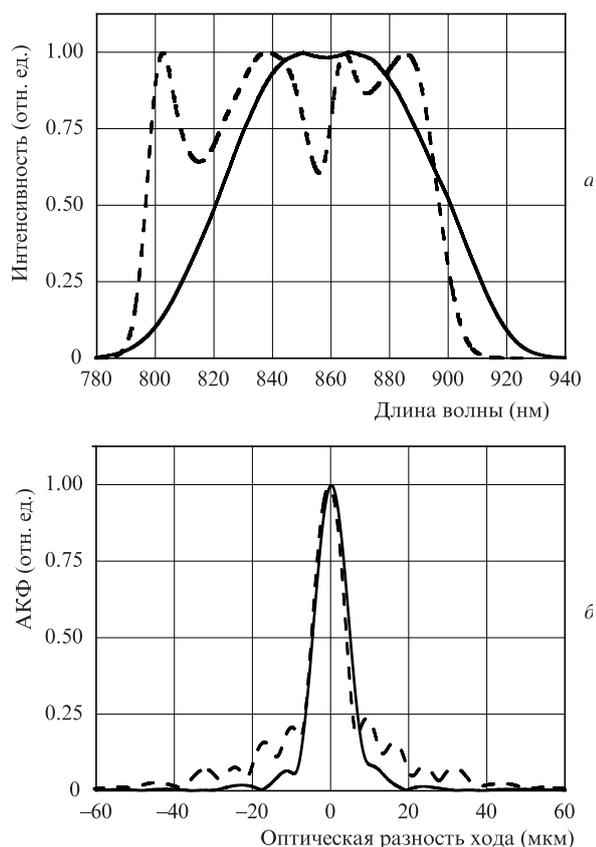


Рис.9. Спектры выходного излучения (а) и центральные пики АКФ (б) серийного источника модели BroadLighter D-840-HP (штриховые кривые) и новой (предварительно – D-860-G) модели (сплошные кривые).

боров серии BroadLighter наибольшей популярностью пользуется модель D-840-HP с полушириной спектра около 100 нм. На рис.9 представлены спектры излучения и АКФ этого прибора и новой модели (предварительное наименование – D-860-G). Есть все основания полагать, что для ОКТ-систем новый прибор окажется предпочтительным.

5. Заключение

Проведены исследования и разработка СЛД-модулей спектрального диапазона 800–900 нм на основе наногетероструктур с толщиной активного слоя в единицы нанометров. СЛД-модули обладают квазигaussianной формой спектра с шириной, превышающей в 2–3 раза ширину спектра объемных СЛД данного спектрального диапазона. Продемонстрирована высокая надежность этих приборов. В результате проведенных исследований начат серийный выпуск новой, не имеющей аналогов, серии светоизлучающих модулей – SLD-34 с центральными длинами волн 810, 840, 860 и 880 нм и непрерывной выходной мощностью до 50 мВт в открытое пространство и 25 мВт через одномодовый световод. Исследованы прототипы новых широкополосных комбинированных источников света с колоколообразной формой спектра.

Авторы выражают благодарность А.Т.Семенову за инициирование проведенного исследования, а также А.А.Задерновскому за обсуждение полученных результатов и ценные рекомендации. Работа частично поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (грант №14.В37.21.0756).

1. Drexler W., Fujimoto J.G. *Optical coherence tomography* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008).
2. Батоврин В.К., Гармаш И.А., Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Любарский А.В., Плявенек А.Г., Сафин С.А., Семёнов А.Т., Шидловский В.Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **23** (2), 113 (1996).
3. Kostin Yu., Lapin P., Shidlovski V., Yakubovich S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7139**, 713905-1 (2008).
4. Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **42** (11), 961 (2012).
5. Ко Т.Н., Adler D.C., Fujimoto J.G., Mamedov D.S., Prokhorov V.V., Shidlovski V.R., Yakubovich S.D. *Opt. Express*, **12** (10), 2112 (2004).
6. Адлер Д.С., Ко Т.Х., Конорев А.К., Мамедов Д.С., Прохоров В.В., Фуджимото Дж.Дж., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **34** (10), 915 (2004).